

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА

У даній роботі знімаються характеристики транзистора, обчислюються його параметри, а також виконуються дослідження підсилення змінного сигналу підсилювачем на транзисторі.

**Фізичні процеси, що мають місце в транзисторі.** Розглянемо біполярний транзистор, тобто напівпровідниковий прилад з двома р-п переходами, для роботи якого є характерним створення струму носіїв заряду обох знаків.

Будова транзистора показано на рис. 1. Він являє собою пластинку германію або іншого напівпровідника, в якій створені три області з різною електропровідністю.

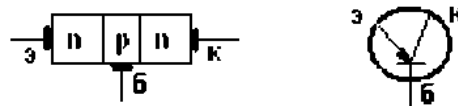


Рисунок 1 – Будова та схема позначення біполярного транзистора

Транзистор типу n-p-n має середню область з дірковою електропровідністю, а дві крайні області – з електронною електропровідністю. Середня область називається базою, одна крайня область – емітером, інша – колектором. Відстань між р-п переходами має бути дуже малою, не більше декількох мікрон, тобто область бази повинна бути дуже тонкою.

Розглянемо, що відбуватиметься в транзисторі при підключенні до нього зовнішніх напруг. Зазвичай до емітерного переходу підключають напругу, що є прямою для основних носіїв заряду областей, прилеглих до цього переходу, а до колекторного переходу – зворотна напруга (рис. 2). При такому включенні транзистора струм між емітером і базою  $i_e$  буде в основному складатися з електронів, що рухаються з емітера до бази. Дірки з бази в емітер проникають легко – для них емітерний перехід також включений в прямому напрямку. Але концентрацію дірок у базі роблять значно меншою концентрації вільних електронів в області емітера. Тому струмом дірок з бази в область емітера можна знехтувати.

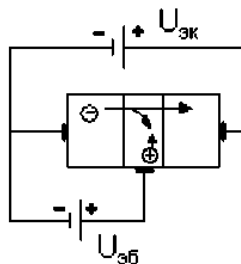


Рисунок 2 – Схема підключення зовнішніх напруг до транзистора

Частина електронів, проходячи через базову область, рекомбінують там з дірками, однак більша їх частина дифундує крізь вузьку базову область і потрапляє в поле колекторного переходу, який для них відкритий. Таким чином, струм колектора практично дорівнює струму емітера, незначно відрізняючись від нього внаслідок рекомбінації частини електронів в базовій області.

Оскільки частина дірок в базі рекомбінують з електронами, які надійшли з емітера, то для їх заповнення в базі утворюються нові дірки (внаслідок відходу зайвих електронів з бази в зовнішній ланцюг). Таким чином, струм бази можна вважати таким, що складається з дірок, які надходять із зовнішнього ланцюга.

Призначенням емітера є інжекція (впуск, впорскування, але не емісія у звичайному розумінні цього терміна) носіїв заряду в базу. База – це область, в яку інжектуюється емітером неосновні для неї носії заряду. Колектор – область, призначенням якої є екстракція (прийом, поглинання) носіїв заряду з бази.

Між розглянутими струмами відповідно до закону Кірхгофа виконується співвідношення

$$i_3 = i_k + i_б. \quad (1)$$

Аналогічне співвідношення виконується і для приростів струмів:

$$\Delta i_3 = \Delta i_k + \Delta i_б. \quad (2)$$

Роботу транзистора ілюструє потенційна діаграма (рис. 3).

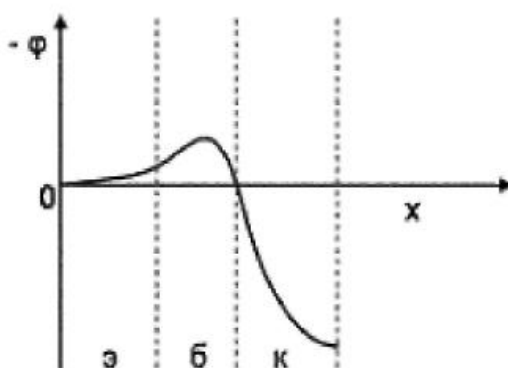


Рисунок 2 – Потенційна діаграма роботи транзистора

Потенціал емітера прийнятий за нульовий. У емітерний перехід, хоча він і включений в пряму напрямку для електронів (основних носіїв заряду в емітерній області), все-таки є невеликий потенційний бар'єр. Висотою цього бар'єру можна управляти, змінюючи напругу між базою і емітером. Поле в області колектора для електронів є прискорюючим.

**Характеристики транзистора.** Залежність між струмами, що діють в транзисторі, має складний характер. Її зручно описувати графічно у вигляді деяких характеристик.

Існують три основні схеми включення транзистора в підсилювачах. Вони відрізняються тим, який із трьох електродів є спільним для вхідного та вихідного ланцюга. Розглянемо схему із спільним емітером (рис. 4). Вхідна напруга  $U_{\text{сигн}}$ , яку необхідно підсилити, подається на ділянку база-емітер. На базу подається також напруга зсуву  $U_{\text{бє}}$ . При цьому в ланцюзі бази протікає деякий струм, тобто вхідний опір транзистора виходить порівняно невеликим. Ланцюг колектора (вихідний ланцюг) живиться від джерела  $U_{\text{кє}}$ . Для отримання підсиленої вихідної напруги в цей ланцюг включений резистор навантаження  $R$ .

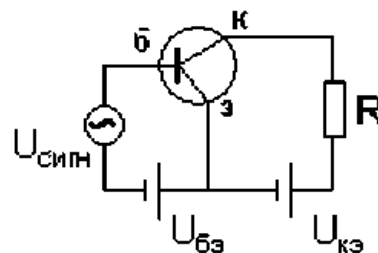


Рисунок 4 – Схеми включення транзистора із спільним емітером

Статичні характеристики знімаються при постійному струмі.

В якості вхідних характеристик для описаної схеми можна розглядати залежність

$$i_b(U_{\text{бє}}) \text{ при } U_{\text{кє}} = \text{const} \quad (3)$$

а вихідних – залежність

$$i_k(U_{\text{кє}}) \text{ при } i_b = \text{const}. \quad (4)$$

Сімейства зазначених характеристик зображені на рис.5.

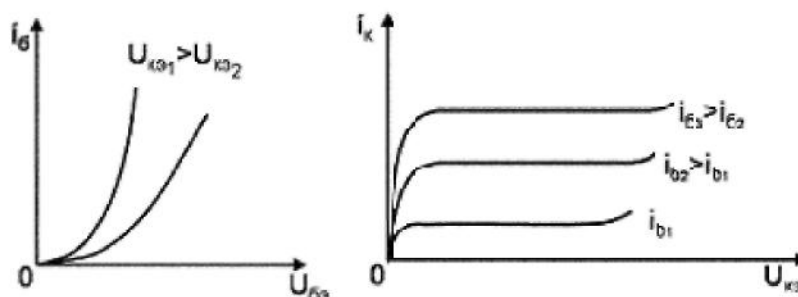


Рисунок 5 – Вольт-амперні характеристики транзисторів

Вхідні і вихідні характеристики транзистора мають тісний зв'язок з вольтамперною характеристикою напівпровідникового діода. Дійсно, вхідні

характеристики відносяться до емітерного переходу, який працює при прямій напрузі. Тому вони подібні характеристиці прямого струму діода. Вихідні характеристики подібні до характеристики зворотного струму діода, так як відображають властивості колекторного переходу, що працює при зворотній напрузі (для основних носіїв заряду).

**Параметри транзистора.** За вхідним характеристикам можна визначити вхідний опір транзистора:

$$R_{вх} = \left. \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta i_{б}} \right|_{U_{кэ} = const}, \quad (5)$$

а по вихідних – вихідний опір:

$$R_{вих} = \left. \frac{\Delta U_{кэ}}{\Delta i_{к}} \right|_{i_{б} = const}. \quad (6)$$

Обчислені таким чином величини  $R_{вх}$  та  $R_{вих}$  є опорами транзистора по змінному струмі, тобто такий опір чинить транзистор змінному струму невеликої амплітуди (у порівнянні з величиною постійного струму, що тече відповідно у вхідному і вихідному ланцюгах). Величини  $R_{вх}$  та  $R_{вих}$  використовуються при аналізі транзистора в схемах підсилення змінного струму або напруги.

Вхідний і вихідний опори транзистора по постійному струму обчислюються за формулами, в яких фігурують не малі прирости, а самі струми і напруги.

Одним з найважливіших параметрів транзисторів є коефіцієнт підсилення струму бази  $\beta$ , який визначається як відношення приросту струму колектора до приросту струму бази при постійній різниці потенціалів між емітером і колектором.

$$\beta = \left. \frac{\Delta i_{к}}{\Delta i_{б}} \right|_{U_{эк} = const}, \quad (7)$$

Так як основна частина струму емітера замикається через ланцюг колектора, коефіцієнт  $\beta$  завжди значно більше одиниці. У сучасних транзисторів  $\beta = 10 \div 300$ .

Іноді буває зручно розглядати інший параметр – коефіцієнт підсилення по струму емітера  $\alpha$ . Він визначається відношенням приросту струму колектора до приросту струму емітера при постійній різниці потенціалів між колектором і базою  $U_{бк}$ :

$$\alpha = \left. \frac{\Delta i_k}{\Delta i_b} \right|_{U_{бк} = const} . \quad (8)$$

Значення  $\alpha$  завжди менше одиниці. Оскільки зазвичай завжди  $i_b \ll i_k$  і відповідно,  $U_{бк} \approx U_{бк}$ , то враховуючи (2), можна записати зв'язок між коефіцієнтом  $\beta$  і  $\alpha$  у вигляді

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} . \quad (9)$$

**Підсилення напруги за допомогою транзистора.** При будь-якій схемі включення транзистора в якості підсилювача електричний струм є наявним як у вихідному ланцюзі, так і у вхідному. Це дозволяє говорити про підсилювачі на транзисторі як про підсилювачі струму. Але вхідний струм транзистора пов'язаний з вхідною напругою (для схеми з загальним емітером струм бази пов'язаний з напругою, що діє між базою і емітером, через вхідний опір  $R_{вх}$ ). Тому можна скористатися цим зв'язком і говорити про підсилення напруги. А з точки зору фізики явища слід мати на увазі, що вихідний струм, тобто струм, що протікає через навантаження і визначає підсилення, залежить від висоти потенційного бар'єру в області емітерного переходу, тобто від напруги, що діє між базою і емітером. Таким чином, схему з транзистором можна розглядати і як підсилювач струму і як підсилювач напруги і, природно, як підсилювач потужності.

Коефіцієнт підсилення по напрузі схеми з транзистором можна обчислити таким чином:

$$K = \frac{\Delta U_{ввих}}{\Delta U_{вх}} = \frac{\Delta i_k R_n}{\Delta i_b R_{вх}} = \beta \frac{R_n}{R_{вх}} . \quad (10)$$

Ця проста формула справедлива лише в невеликій області режимів роботи транзистора. Більш строгий розрахунок виконується за більш складною формулою.

Як і в будь-якому іншому підсилювачі, коефіцієнт підсилення транзисторного підсилювача залежить від частоти сигналу і його амплітуди.

**Опис експериментальної установки.** Вивчення транзистора виконується на установці, що представлена на рис. 6. Дана схема створена за допомогою програми *electronic workbench demo version*, що дозволяє виконати потрібні практичні дослідження.

На установці досліджується транзистор типу МП37Б. Живлення схеми здійснюється від джерела постійної напруги 15 в. Струм, що споживається схемою від джерела, не більше 5 мА. У схемі під'єднані прилади, що вимірюють струм і напругу бази та колектора. На вхід транзисторного

підсилювача подається сигнал від генератора змінної напруги. Форму і величину цього сигналу на вході і виході підсилювача можна спостерігати за допомогою осцилографа.

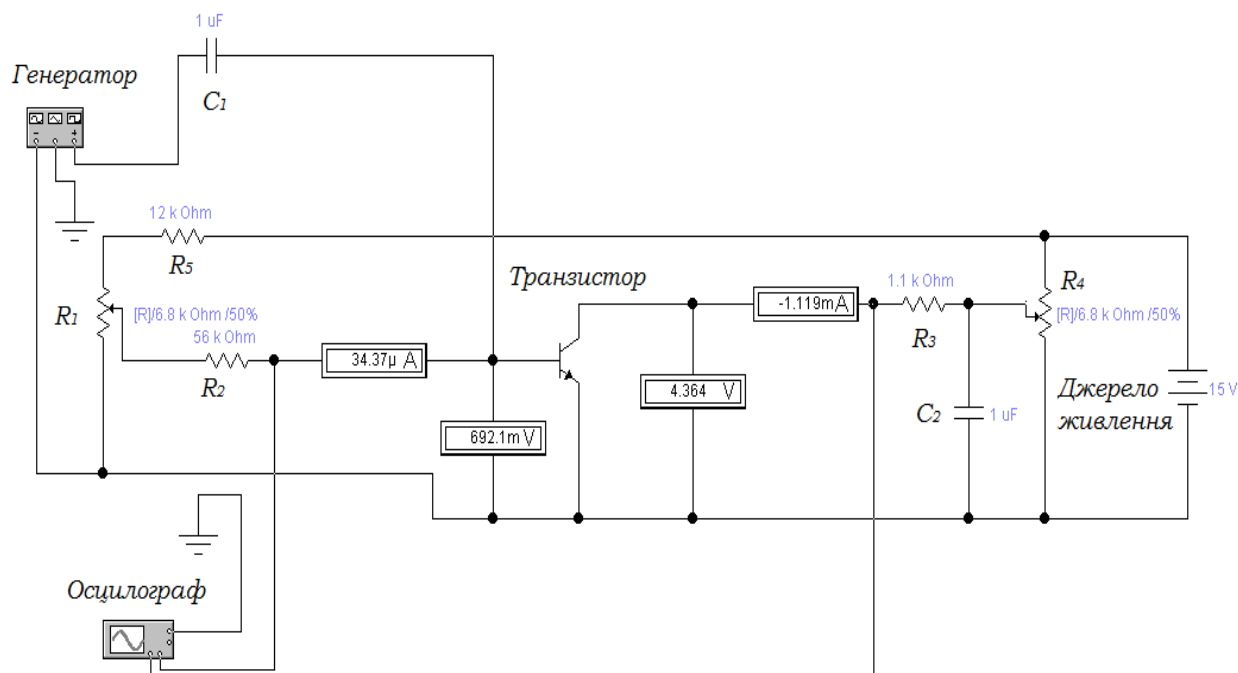


Рисунок 6 – Схема установки для дослідження біполярного транзистора

Величина постійної напруги на базі транзистора регулюється потенціометром  $R_1$ , а на колекторі – потенціометром  $R_4$ . Резистор  $R_2$  відіграє допоміжну роль, обмежуючи величину базового струму транзистора і сприяючи плавності регулювання базової напруги. Резистор  $R_3$  при вивченні підсилення виконує роль навантаження. Резистор  $R_5$  зменшує величину напруги, що подається на потенціометр  $R_1$ . Конденсатор  $C_1$  дозволяє підвести до бази транзистора змінний сигнал, не порушуючи режиму роботи транзистора по постійному струму. Конденсатор  $C_2$  "закорочує" на мінус схеми один з кінців навантажувального резистора  $R_2$  (по змінному струмі). Величини елементів схеми:  $R_1 = R_4 = 6,8$  кОм,  $R_2 = 56$  кОм,  $R_3 = 1,1$  кОм,  $R_5 = 12$  кОм,  $C_1 = C_2 = 1$  мкФ.

Струм бази вимірюється мікроамперметром з межею вимірювання 100 мкА, струм колектора – міліамперметром з межею вимірювання 3 мА.

Напруга на базі і колекторі вимірюються вольтметрами з великим вхідним опором.

Як джерело підсилюваного змінного сигналу використовується генератор (50 мВ).

Візуально сигнал спостерігається на екрані осцилографа.

Величина підсилюваного сигналу оцінюється по вольтметру генератора, а величина пісненого сигналу – за допомогою каліброваної решітки осцилографа.

### **Вправа 1. Зняття вихідних характеристик транзистора**

Дослідження виконуються за схемою, що наведена на рис. 6. Значення резистора  $R_3$  встановити рівним нулю. Значення опору потенціометрів  $R_1$  і  $R_4$  встановити максимальним. Змінюючи величину опору потенціометра  $R_1$ , встановити струм бази  $I_b = 10$  мкА. Потім змінювати значення опору потенціометра  $R_4$  до появи колекторного струму (при цьому струм бази може злегка змінитися). Потенціометром  $R_1$  відновити значення  $I_b = 10$  мкА. Утворені при цьому значення  $U_{ке}$  та  $I_k$  занести в таблицю. Зняти залежність  $I_k(U_{ке})$  при  $I_b = 10$  мкА, збільшуючи  $U_{ке}$  за допомогою  $R_4$  і підтримуючи  $I_b$  постійним за допомогою  $R_1$ .

Після цього аналогічним чином зняти залежність  $I_k(U_{ке})$  при  $I_b = 20, 30$  і  $40$  мкА. Результати вимірювань занести в таблицю.

Побудувати графіки  $I_k(U_{ке})$  при  $I_b$  як параметр.

Для використання транзистора як підсилювач змінного сигналу (вправа 3) транзистор необхідно поставити в режим роботи по постійному струму, що забезпечує лінійну зв'язок між  $U_{ке}$  та  $I_k$  (при цьому спотворення підсилюється сигналу будуть найменшими). У зв'язку з цим на графіку, де побудовано сімейство вихідних характеристик транзистора, визначити точку, приблизно відповідну центру лінійних ділянок характеристик. Нехай це буде точка з координатами  $U_{ке} = U_{ке}^*$ ,  $I_b = I_b^*$ .

Записати значення  $U_{ке}^*$  і  $I_b^*$ . Вважаючи, що в околиці цієї точки параметри транзистора практично незмінні, визначити величину коефіцієнта підсилення транзистора по струму  $\beta^*$  (див. ф-лу (7)) і величину вихідного опору транзистора  $R_{вих}$  (див. ф-лу (6)).

### **Вправа 2. Зняття вхідної характеристики транзистора.**

За допомогою потенціометра  $R_4$  встановити  $U_{ке} = U_{ке}^*$

Зняти залежність  $I_b(U_{бс})$ , занести дані в таблицю. При цьому напруга  $U_{бс}$  збільшувати за допомогою потенціометра  $R_1$ , підтримуючи  $U_{ке} = U_{ке}^*$  за допомогою потенціометра  $R_4$ . Закінчивши вимірювання, зменшити напруження і струми в схемі до мінімуму.

Побудувати графік  $I_b(U_{бс})$  при  $U_{ке} = U_{ке}^*$ . Для значення  $I_b = I_b^*$  по нахилу залежності  $I_b(U_{бс})$  визначити величину вхідного опору транзистора  $R_{вх}$  (див. формулу (5)).

### **Вправа 3. Спостереження ефекту підсилення змінного сигналу транзистором.**

Знаючи величини  $\beta$  і  $R_{вих}$ , знайдені в попередніх вправах для певного режиму роботи транзистора ( $U_{ке} = U_{ке}^*$ ,  $I_b = I_b^*$ ), а також знаючи опір резистора навантаження  $R_n$ , можна обчислити величину коефіцієнта посилення транзисторного підсилювача, в якому транзистор коштує в зазначеному режимі, а в якості навантаження використовується резистор  $R = R_n$ . Обчислити коефіцієнт посилення  $K$  (див. ф-лу (10)).

Зняти короткозамикаючого перемичку з резистора  $R_3$ . За допомогою потенціометрів  $R_1$  та  $R_4$  встановити режим роботи транзистора по постійному струму, що відповідає обраному за результатами попередніх вправ ( $U_{ке} = U_{ке}^*$ ,  $I_k = I_k^*$ ). Вольтметр  $V_1$  виключити зі схеми. Включити генератор і подати з

нього невелику змінну напругу  $U$  (Наприклад, 10 мВ) частоти (наприклад, 1 кГц) на вхід транзистора  $\tilde{U}_{вх}$  (Через конденсатор  $C_1$ ). Величина цієї напруги визначається за допомогою вимірювального приладу генератора.

Підключити до схемою відповідно до рис. 6 осцилограф, і на його екрані отримати зображення сигналу, що діє на вході транзистора, а потім – на виході. Переконайтеся в тому, що вихідний сигнал зберіг свою гармонійну форму. Якщо ж цього немає, то домогтися цього, зменшивши  $\tilde{U}_{вх}$ . Сигнал з осцилографа скопіювати з робочого вікна вищезгаданої програми та додати до звіту (рис. 7).

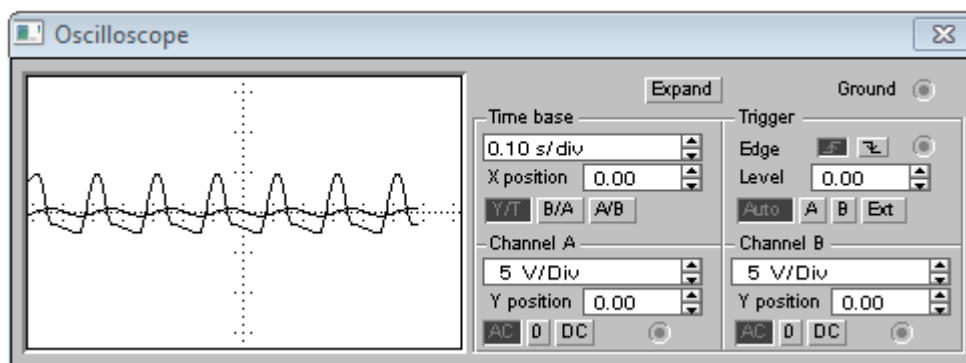


Рисунок 7 – Сигнал з осцилографа

Повернувшись до оптимального режиму роботи транзистора, тобто при  $U_{ке}^*$  та  $I_{к}^*$  і при досить малому  $\tilde{U}_{вх}$ , виміряти величину змінної напруги на виході транзистора  $\tilde{U}_{вих}$  за його зображенням на екрані осцилографа:

$$\tilde{U}_{вих} = \frac{C_y L_y}{2\sqrt{2}}, \quad (11)$$

де  $\tilde{U}_{вих}$  – ефективне значення напруги (у вольтах).;

$C_y$  – чутливість осцилографа, зазначена на його лицьовій панелі (у вольтах на велику поділку шкали на екрані осцилографа);

$L_y$  – розмір зображення досліджуваної напруги по вертикалі (в великих поділках).  $1/2(\sqrt{2})$  – коефіцієнт, обумовлений перекладом величини, спостережуваного сигналу на екрані осцилографа (подвоєна амплітуда) в ефективне значення.

Обчислити коефіцієнт підсилення сигналу, що отримується експериментально:

$$K_{експ} = \frac{\tilde{U}_{вих}}{\tilde{U}_{вх}}. \quad (12)$$

Порівняти  $K_{експ}$  та  $K_{теор}$ .



### Контрольні питання

1. Що являє собою транзистор n-p-n типу?
2. Яку роль відіграє емітер, база і колектор в транзисторі?
3. Чому базу транзистора роблять тонкою?
4. Які носії заряду є основними і неосновними в емітерній, базовій і колекторній областях?
5. Для яких носіїв заряду колекторний перехід включається в зворотному напрямку?
6. Пояснити схожість між вхідними та вихідними характеристиками транзистора з одного боку і вольтамперної характеристикою діода – з іншого?
7. Як можна знайти величини вхідного і вихідного опорів транзистора?
8. Як можна визначити коефіцієнт підсилення транзистора по струму і напрузі?
9. Якого порядку зазвичай бувають вхідний і вихідний опори транзистора?

### Література

1. Калашников С. Г. Электричество. М., Физматлит. 2004.
2. Сивухин Д.В. Общий курс физики, т.Ш. Электричество. М.,2004.
3. Иродов И. Е. Электромагнетизм. Основные законы. 2006 г. .
4. Жеребцов И. П. Основы электротехники. Энергоатомиздат. 1989.
5. Трофименко И. Т., Лебедева Е. В., Седлецкая Н. С. Практикум по радиофизике. Под ред Сухорукова А. П. Изд-во Моск. ун-та. 1997 г.
6. Белокопытов Г. В. и др. Основы радиофизики. Учебное пособие. М., 1996 г.